

Les particules élémentaires

Masterclass Belle II

Isaac Consigny

March 11, 2025



Un peu d'Histoire: l'idée de particules élémentaires

Démocrite, un philosophe grec, a proposé l'idée d'atomes en **400 av. J.-C.**

Atome vient du grec "atomos" qui signifie "**insécable**": le plus petit élément de matière qu'on ne pourrait pas diviser.



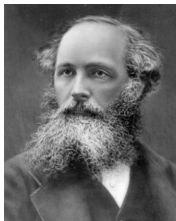
Démocrite

Démocrite, un philosophe grec, a proposé l'idée d'atomes en **400 av. J.-C.**

Atome vient du grec "atomos" qui signifie "**insécable**": le plus petit élément de matière qu'on ne pourrait pas diviser.



Démocrite



James Clerk Maxwell

1865, naissance de l'**électromagnétisme**, les équations de **Maxwell** unifient les phénomènes électriques et magnétiques.

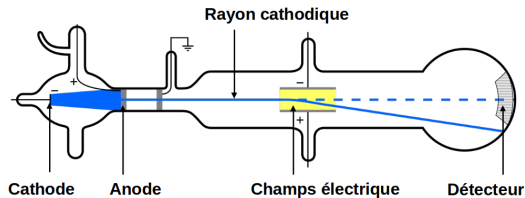
L'électromagnétisme est la force qui régit les **particules chargées** comme l'électron (charge -1) et le proton (charge +1).

Un peu d'Histoire: l'atome et l'électron

1897 : J.J. Thomson découvre l'**électron**, première particule élémentaire.



J.J. Thomson



Expérience de Thomson

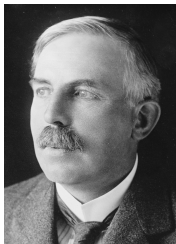
Un **rayon cathodique** est dévié par un **champ électromagnétique**.

La **courbure** permet de mesurer la **masse** de l'électron, très **inférieur** à celle de l'**atome** !

Il existe donc des **particules plus petites que l'atome** !

Un peu d'Histoire: l'atome et l'électron

1897 : J.J. Thomson découvre l'électron, première particule élémentaire.



Ernest Rutherford



J.J. Thomson

1911 : Ernest Rutherford, Marsden et Geiger découvrent le noyau de l'atome.

Un peu d'Histoire: les premiers accélérateurs

1931 : **Ernest Lawrence** et **Milton Stanley Livingston** inventent le **cyclotron**, un accélérateur de particules.



Cyclotron

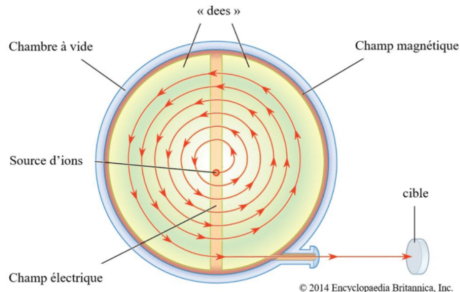


Schéma d'un cyclotron

Principe: un **champ magnétique** permet d'accélérer les particules en spirale.

Plus on augmente la **taille** du **cyclotron**, plus on augmente la **vitesse** des particules.

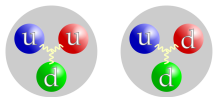
Lawrence a construit des **cyclotrons** de plus en plus **grands**, jusqu'à atteindre **4.40 m de diamètre**, en **1942**.

Un peu d'Histoire: les premiers accélérateurs

1931 : **Ernest Lawrence** et **Milton Stanley Livingston** inventent le **cyclotron**, un accélérateur de particules.



Cyclotron



Les quarks

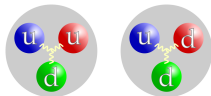
1964 : **Murray Gell-Mann** propose le modèle des **quarks** pour expliquer la structure des protons et des neutrons.

Un peu d'Histoire: les premiers accélérateurs

1931 : Ernest Lawrence et Milton Stanley Livingston inventent le **cyclotron**, un accélérateur de particules.



Cyclotron



Les quarks

1964 : Murray Gell-Mann proposent le modèle des **quarks** pour expliquer la structure des protons et des neutrons.

1968 : Richard Feynman prouve l'existence des quarks grâce à un **accélérateur de particules**: le SLAC



Richard Feynman

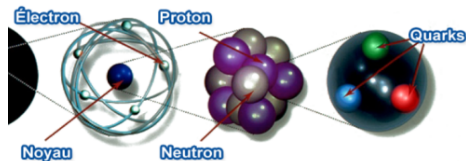
Connaissez-vous d'autres accélérateurs de particules ?

Les briques de la matière



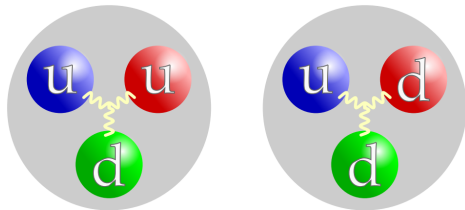
- Les **particules** sont les **briques** de base de la matière.
- Elles composent les **atomes**, qui composent les **molécules**, qui composent la **matière**.
- Certaines particules sont **composites** : elles sont composées de **particules élémentaires**.

L'atome



- L'**atome** est composé d'un **noyau** et d'**électrons** qui tournent autour.
- Le **noyau** est composé de **protons** et de **neutrons**.
- Les **protons** et les **neutrons** sont composés de **quarks**.
- Les **électrons** sont des particules élémentaires.

Les particules élémentaires



Le proton et le neutron

- Les **quarks** sont les particules qui composent les protons et les neutrons.
- Les **quarks** sont des **particules élémentaires**: elles n'ont pas de sous-structure.
- Ce sont des particules avec une **charge électrique**: $\frac{2}{3}$ pour le **quark up** et $-\frac{1}{3}$ pour le **quark down**
- Avec les **quarks** et les **électrons**, on peut construire toute la matière.
- Pourtant il existe **beaucoup d'autres** particules élémentaires !

Connaissez-vous d'autres particules élémentaires ?

Le modèle standard de la physique des particules

La théorie qui décrit les **17** particules élémentaires connues, et leurs **interactions** (électromagnétisme, l'interaction forte et interaction faible)

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z^0 boson Z^0	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	$W^\pm$ boson $W^\pm$	
				BOSONS DE JAUGE	

- Chaque particule a une **anti-particule** avec la même masse mais toutes les charges opposées.
- Les quarks n'existent pas seuls (**libres**), ils sont toujours en groupe de 3 ou 2 **états liés**.
- La plupart de ces particules **ne se trouvent pas dans la nature**, mais sont produites et observées grâce des accélérateurs de particules (comme **superKEKB** et son **détecteur Belle II**).

Les neutrinos

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²
charge →	-1	-1	-1
spin →	1/2	1/2	1/2
	e électron	μ muon	τ tau
LEPTONS	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ neutrino tauique

- Les **neutrinos** sont des particules très légères (presque 0), sans charge électrique et très peu interactives.
- Ils sont produits en grande quantité par le **soleil** et les **réacteurs nucléaires**.
- Ils sont très difficiles à détecter car ils interagissent très peu avec la matière.
- Ils ne sont pas détectables par les **détecteurs de particules** des expériences comme **Belle II**.
- Ils sont détectés par des **détecteurs spécifiques** comme **KM3NeT** dans la Méditerranée.

Au delà du modèle standard

Le modèle standard est incomplet, certaines questions restent sans réponse:

- **Pourquoi les neutrinos ont une masse ?**

Le modèle standard prédit que les neutrinos ont une masse nulle, pourtant les expériences ont montré qu'ils ont une masse très faible.

- **Quelle est la nature de la matière noire et l'énergie noire ?**

95% de l'univers est composé de matière et d'énergie noire, qui ne sont pas expliquées par le modèle standard.

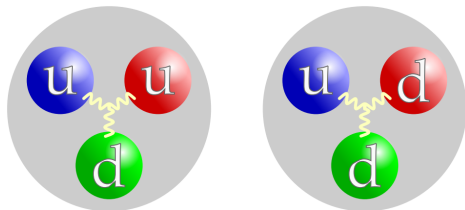
- **Où est passée l'antimatière ?**

On estime que, peu après le Big Bang, il y avait autant de matière que d'antimatière. Le modèle standard n'explique pas entièrement pourquoi l'antimatière a quasiment disparu.

- **Comment décrire la gravité à l'échelle des particules ?**

La gravité n'est pas incluse dans le modèle standard, la physique des particules n'explique pas la gravité.

La "couleur" des quarks

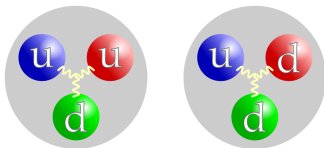


Les quarks dans les protons et les neutrons

- **Couleur** des quarks $\neq$ couleur dans le sens habituel
- Les quarks portent une charge de couleur, qui peut être **rouge, vert ou bleu**.
- Seules les particules **blanches** sont observées.

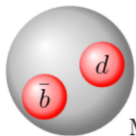
Comment former des particules blanches ?

La couleur des quarks

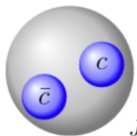


Rouge + Bleu + Vert = Blanc

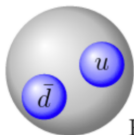
- Les **baryons** sont formés de **3 quarks** (rouge, vert, bleu)



Méson B^0



J/ψ



Pion chargé π^+

Rouge + Anti-rouge = Blanc

- Les **mésons** sont formés d'un **quark** et d'un **antiquark** (rouge + antirouge = blanc)

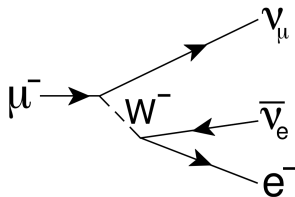
Il existe de très nombreuses particules composées de quarks comme les mésons et les baryons mais aussi les tétraquarks 4 quarks et les pentaquarks 5 quarks.

Pourquoi n'observe t'on que des protons, des neutrons (= quarks u et d) et des électrons dans la matière ?

Pourquoi ne voit-on pas d'atomes fait à partir d'autres baryons ou de mésons ?

Où sont les quarks les plus lourds ?

Durée de vie et désintégration



Exemple: désintégration du muon en un électron et deux neutrinos

- La plupart des particules sont **instables** : elles ont une **durée de vie très courte** et se désintègrent en d'autres particules plus légères
- Seuls les **neutrons*** **protons**, les **électrons** et les **photons** sont **stables**.
- Ces désintégrations sont régies par les **interactions fondamentales** et doivent conserver certaines quantités comme la **charge électrique**.

Neutron (**u d d**) $\rightleftharpoons$ Proton (**u u d**) ?

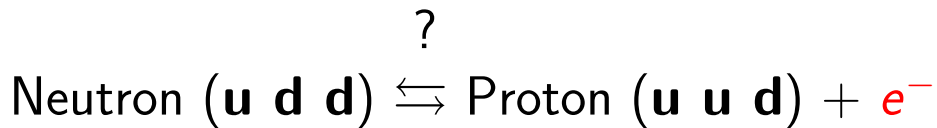
Neutron (**u d d**) $\rightleftharpoons$ Proton (**u u d**) ?

Charge : $2/3 + (-1/3) + (-1/3) = 0$



Charge : $2/3 + 2/3 + (-1/3) = 1$

Il faut **équilibrer** les charges électriques !



$$\text{Charge} = 0$$

$$\text{Charge} = 1 + (-1) = 0$$



Il faut aussi prendre en compte la masse !

Le neutron est plus massif que le proton, l'électron et le neutrino réunis.

Il va donc spontanément se désintégrer : sa **durée de vie** est d'environ **15 minutes**.

C'est ce qui permet les centrales et explosions nucléaires.

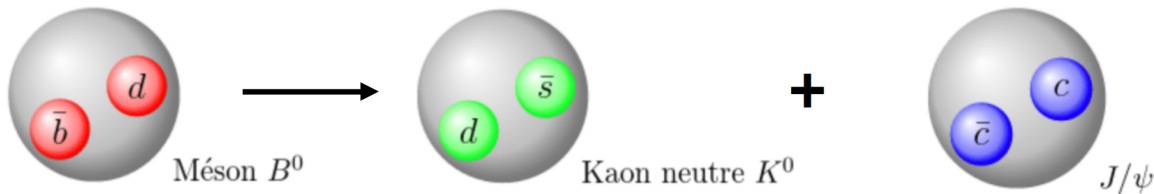


Désintégration des particules

Les particules **instables** se désintègrent en d'autres particules plus légères.

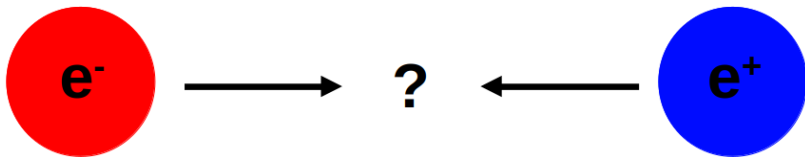
La **durée de vie** d'une particule, c'est à dire le temps avant qu'elle ne se désintègre, est **inversement proportionnel à sa masse**.

Les particules peuvent se désintégrer selon différents **modes de désintégration**.



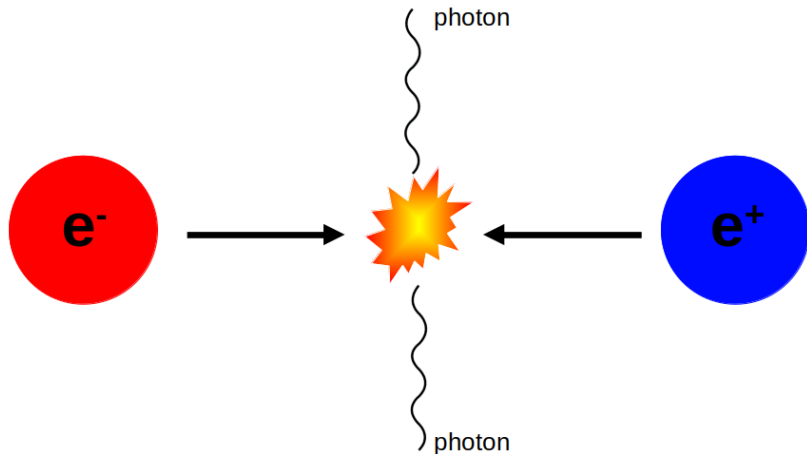
Pour finir : collisions !

Imaginons une collision entre un électron et un positron (anti-électron).

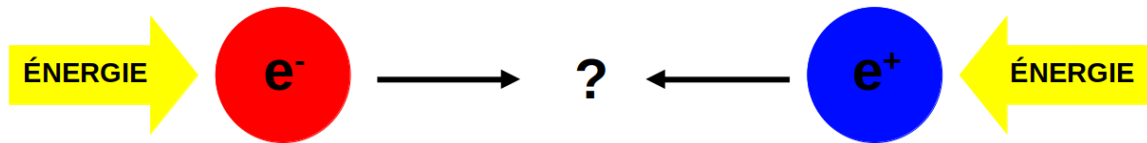


Pour finir : collisions !

Quelques photons...



Et si on ajoute **beaucoup** d'énergie ?



Pour finir : collisions !

Plein de **particules** !

